

# Aerodynamische Untersuchungen an abgestumpften Kegeln im Überschallbereich (Machzahl $Ma = 2$ bis $4$ )

Köster, H.

Veröffentlicht in:  
Abhandlungen der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 19, 1967,  
S. 1-12



Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

# Aerodynamische Untersuchungen an abgestumpften Kegeln im Überschallbereich (Machzahl $Ma = 2$ bis $4$ ) \*

Von H. Köster

Vorgelegt von Herrn H. Schlichting

(Eingegangen am 6. 1. 1967)

**Übersicht:** Die Abrundung der Nase von Flugkörpern im Überschallbereich hat durch die neuere Entwicklung der Raumfahrt-Aerodynamik, insbesondere im Hinblick auf Fragen des Wärmeüberganges, wesentliche Bedeutung erlangt. Um einen Beitrag zu diesem Problemkreis zu geben, wurden im kleinen Überschall-Windkanal der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFL) einige aerodynamische Untersuchungen an Kegeln mit verschiedenen Abrundungsradien der Nase ausgeführt. Es werden die Ergebnisse von Messungen an einem Kegel mit einem halben Kegelwinkel von  $\gamma = 10^\circ$  mitgeteilt. Die Untersuchungen umfassen die Bestimmung des Stoßabstandes, der Druckverteilung und des Vorkörperwiderstandes bei verschiedener Abrundung der Kegelspitze im Machzahlbereich von  $Ma = 2$  bis  $4$ . Die Ergebnisse zeigen eine Abnahme des Verhältnisses von Stoßabstand zu Nasenradius mit zunehmender Abrundung und Machzahl, wobei jedoch der absolute Stoßabstand mit der Nasenabrundung zunimmt. Die Größe der Abrundung hat keinen Einfluß auf die Druckverteilung, während der Vorkörperwiderstand mit zunehmender Abstumpfung sehr stark ansteigt.

*Summary:* Blunting of the nose of missiles in supersonic flow has attained an essential importance as a consequence of the modern development of space aerodynamics, particularly in view of the problems connected with heat transfer. To give a contribution to these problems, some aerodynamic investigations on cones with various nose radii have been carried out in the small supersonic wind tunnel of the DFL. Results of measurements on a cone with half cone angle of  $\gamma = 10^\circ$  are presented. The investigations include the determination of the shock stand-off distance, the pressure distribution, and the drag of the forebody at various nose curvatures of the cone the Mach number ranging from 2 to 4. The results show that the ratio of shock stand-off distance to radius of curvature decreases with increasing curvature and Mach number, while, however, the absolute shock distance increases with the nose curvature. The degree of curvature has no influence on the pressure distribution whereas the forebody drag rises considerably with increasing bluntness.

## 1. Einleitung

In der neueren Entwicklung der Raumfahrt-Aerodynamik haben Flugkörper mit stumpfer Nase, insbesondere im Hinblick auf Fragen des Wärmeübergangs, eine wesentliche Bedeutung erlangt. Bei hohen Überschallgeschwindigkeiten bereitet nämlich die kinetische Aufheizung der Körper im Staupunktnähe durch adiabatische Kompression und durch Reibung erhebliche Schwierigkeiten. Der Wärmeübergang am Staupunkt ist proportional zu  $1/\sqrt{r}$ . Zur Herabsetzung der Aufheizung im Staupunktgebiet ist es deshalb erforderlich, den Nasenradius

\* Diese Untersuchungen wurden im Institut für Aerodynamik (Leiter: Prof. Dr. H. Schlichting) der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt Braunschweig mit Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft durchgeführt.

zu vergrößern, und somit muß bei hohen Überschallgeschwindigkeiten eine Abstumpfung der Flügelvorderkante bzw. der Rumpfnase des Flugkörpers vorgenommen werden.

Nachstehend wird über einige aerodynamische Eigenschaften von spitzen und abgestumpften Kreiskegeln mit einem halben Kegelwinkel von  $\gamma = 10^\circ$  bei symmetrischer Anströmung berichtet. Durch Schlierenaufnahmen wurde der Stoßabstand von der Nase ermittelt. Druckmessungen auf der Körperoberfläche und Widerstandsmessungen geben den Einfluß der Abstumpfung und der Machzahl. Die Messungen wurden bei Machzahlen  $Ma = 2$  bis 4 im kleinen Überschall-Windkanal der DFL (Meßquerschnitt  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ) durchgeführt.

## 2. Bezeichnungen

### a) Geometrische Größen

$D_B$	$= 2 R_B$	Durchmesser der Bodenfläche der Kegel
$d$		Durchmesser der Haltestange
$F$	$= \pi R_B^2$	Bodenfläche der Kegel
$l$		charakteristische Länge des umströmten Körpers
$r$		Abrundungsradius der Kegelnase
$R_B$		Radius der Bodenfläche der Kegel
$s$		Koordinate vom Staupunkt längs der Oberfläche der Kegel (siehe Abb. 8)
$\gamma$		halber Öffnungswinkel der Kegel

### b) Aerodynamische Größen

$B, C$		Konstante (siehe Gl. (1))
$c_{pB}$		Druckbeiwert am Boden des Kegels
$c_W$	$= W/F \cdot q_\infty$	unkorrigierter Widerstandsbeiwert des Kegels
$c_{WV}$		Widerstandsbeiwert der Kegelvorkörper (siehe Gl. (4))
$\epsilon$		Abstand des Stoßes von der Nase des Kegels
$g$		Schwerebeschleunigung ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )
$Ma$		Machzahl
$p$		statischer Druck
$p_{0V}$		Vorkammerdruck
$p_0'$		Ruhedruck hinter einem senkrechten Verdichtungsstoß
$q_\infty$	$= \frac{1}{2} \rho \cdot V_\infty^2$	Staudruck
$R$	$= 29,3 \text{ m}^3/\text{K}$	Gaskonstante für Luft
$Re_B$	$= \frac{V_\infty D_B}{\nu}$	Reynoldszahl

$T_{0V}$	Vorkammertemperatur
$V_\infty$	ungestörte Anströmgeschwindigkeit der Kegel
$W$	Widerstand der Kegel
$\kappa = c_p/c_v$	Adiabatexponent ( $\kappa = 1,4$ für Luft)
$\nu$	kinematische Zähigkeit der Luft
$\rho$	Luftsdichte

## e) Indices

$B$	am Boden der Kegel
$\infty$	in der ungestörten Anströmung

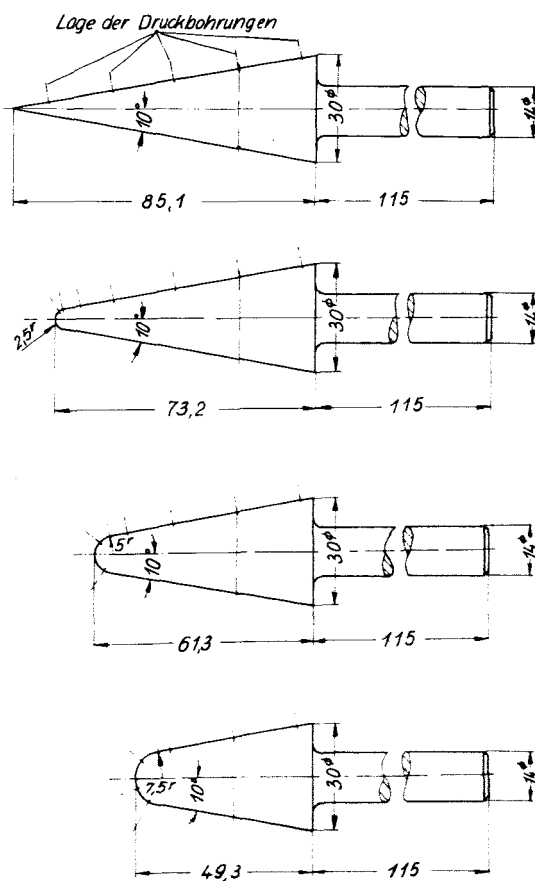


Abb. 1. Übersicht über die Kegelmodelle mit verschiedenen Abrundungsradien der Kegelnase; halber Kegelwinkel  $\gamma = 10^\circ$ ; Radius der Kegelgrundfläche  $R_B = 15$  mm; Abrundungsradien  $r = 0; 2,5; 5; 7,5$  mm

### 3. Versuchsaufbau und Durchführung der Messungen

#### 3. 1. Versuchsanlage

Die Druckverteilungs- und Widerstandsmessungen an den spitzen und stumpfen Kegeln sowie die Schlierenaufnahmen wurden im kleinen Überschallwindkanal der DFL (Meßquerschnitt  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ) durchgeführt. Dieser Windkanal arbeitet intermittierend nach dem „blow-down“ Prinzip und ist an das Druckluftversorgungssystem der Überschallanlage angeschlossen. Mit der Verstelldüse des Windkanals können Machzahlen von  $Ma = 1,5$  bis  $4,5$  kontinuierlich eingestellt werden. Die seitliche Begrenzung der Meßstrecke besteht aus schlierenfreien Glasscheiben, so daß einwandfreie Schlierenaufnahmen gemacht werden können. Eine Beschreibung des Windkanals ist in [1] enthalten.

#### 3. 2. Kegelmodelle

Die hier vermessenen Modelle sind Kreiskegel mit einem halben Kegelwinkel von  $\gamma = 10^\circ$  und einem Bodendurchmesser von  $D_B = 2R_B = 30 \text{ mm}$ . Der Durchmesser der zur Befestigung der Modelle notwendigen Haltestangen beträgt  $d = 14 \text{ mm}$  (Abb. 1). Die Abrundungsradien bei den abgestumpften Kegeln betragen  $r = 2,5; 5$  und  $7,5 \text{ mm}$ , so daß sich Verhältnisse von  $r/R_B = 0,167; 0,333$  und  $0,500$  ergeben. Die Lage der Druckbohrungen bei den einzelnen Kegeln ist in Abb. 1 eingezeichnet. Den Einbau der Modelle in den Windkanal zeigt Abb. 2.

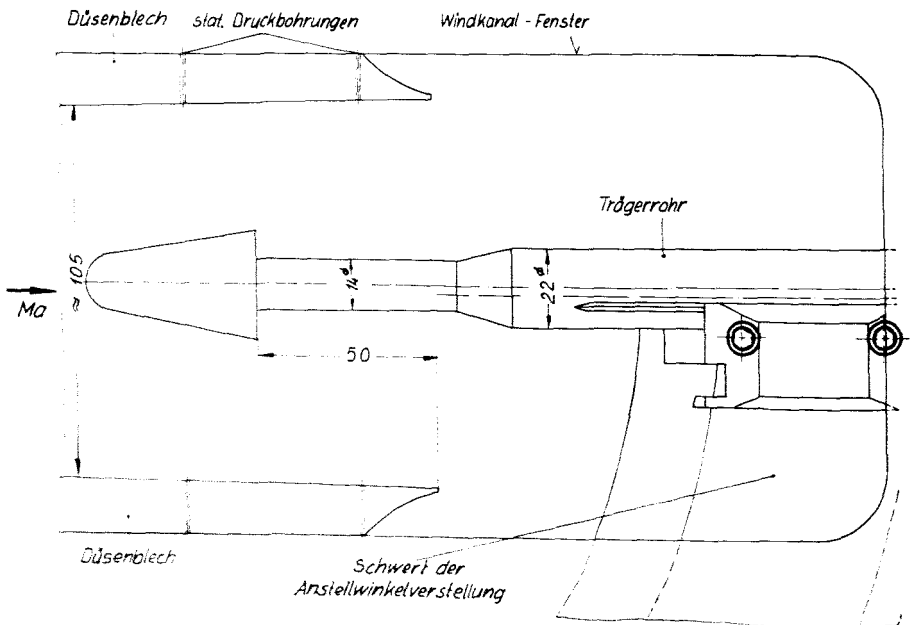


Abb. 2. Einbau der Kegelmodelle in die Meßstrecke des  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  Überschall-Windkanals der DFL

### 3. 3. Meßeinrichtung

Zur Bestimmung der Stoßabstände an den abgestumpften Kegeln wurden mit einer Schlierenoptik, deren Prinzipskizze in Abb. 3 angegeben ist, bei den verschiedenen Machzahlen photographische Aufnahmen gemacht. Auf diesen Aufnahmen konnte der Stoßabstand von der Modellnase ausgemessen werden.

Die Messung der Druckverteilungen wurde mit einem mit Quecksilber gefüllten Vielfachmanometer vorgenommen. Die Druckschläuche können mit einer Schlauchabklemmung gleichzeitig abgeklemmt werden, so daß die Meßwerte nach dem Versuch abgelesen werden konnten.

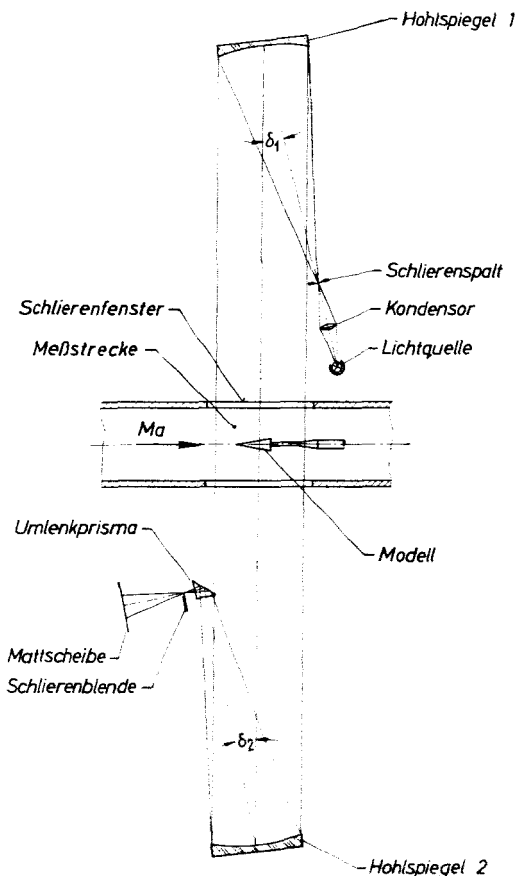


Abb. 3. Prinzip-Skizze der Schlierenanordnung zur Strömungsbeobachtung in der Meßstrecke des  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  Überschall-Windkanals

Die Widerstandskräfte wurden mit einer Dehnungsmeßstreifenwaage nach Abb. 4 gemessen. Es wurde eine Wheatstonesche Brücke aus vier aktiven Dehnungsmeßstreifen benutzt. Die verwendete additive Schaltung besitzt einerseits eine große Empfindlichkeit, und zum anderen ist dabei die Temperaturkompen-

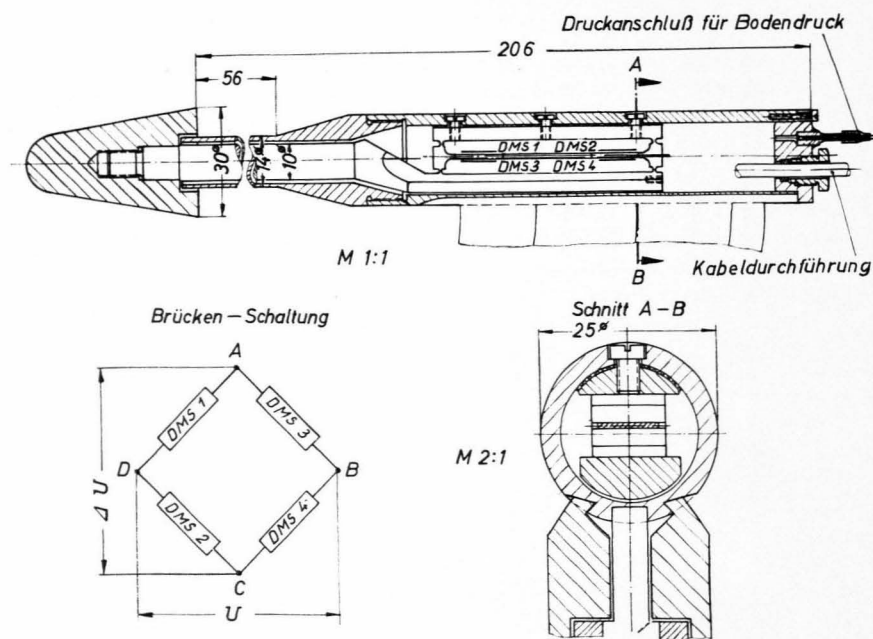


Abb. 4. Dehnungsmeßstreifen-Widerstandswaage für rotationssymmetrische Modelle zum Einbau in den  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  Überschall-Windkanal

sation ohne besondere Maßnahmen am günstigsten. Die Meßgenauigkeit bei den tiefen Temperaturen in der Meßstrecke ist durch Abkühlung der Waage etwas beeinträchtigt. Zur Messung der Brückenverstellung wurden ein Trägerfrequenz-Meßverstärker (KWS/6 T-5) der Firma Hottinger mit einer Trägerfrequenz von 5 kHz, ein Tiefpaßfilter und ein Digitalvoltmeter benutzt. Mittels einer Eichkurve wurden aus den Spannungen die Widerstandskräfte bestimmt. Der Bodendruck wurde durch den Schaft der Widerstandswaage (Abb. 4) mit einem Quecksilbermanometer gemessen. Die Untersuchungen wurden bei den Machzahlen  $Ma = 1,93; 2,44; 2,93; 3,41$  und  $3,97$  durchgeführt.

Die spezifische Reynoldszahl wurde nach folgender Gleichung berechnet:

$$\frac{Re}{l} = \frac{p_{0V}}{B} \sqrt{\frac{\kappa}{gR}} Ma \left[ \frac{1}{T_{0V}} \left( 1 + \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2 \right)^{\frac{-1}{\kappa - 1}} + \frac{C}{T_{0V}^2} \left( 1 + \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2 \right)^{\frac{\kappa - 2}{\kappa - 1}} \right] \quad (1)$$

Diese Gleichung ist in [1] abgeleitet worden. Die Konstanten  $B$  und  $C$  rühren her aus der Sutherland-Gleichung für die Abhängigkeit des Zähigkeitsbeiwertes von der Temperatur; sie betragen für Luft nach [2]

$$B = 1,532 \cdot 10^{-7} \text{ kps/m}^2 \cdot ^\circ K^{\frac{1}{2}} \text{ und } C = 123,6 \cdot ^\circ K.$$

Bei den vorliegenden Versuchen ergaben sich spezifische Reynoldszahlen von  $Re/l = 3,2 \cdot 10^7/\text{m}$  bis  $6,5 \cdot 10^7/\text{m}$  bei  $Ma = 1,93$  bis  $3,97$ .

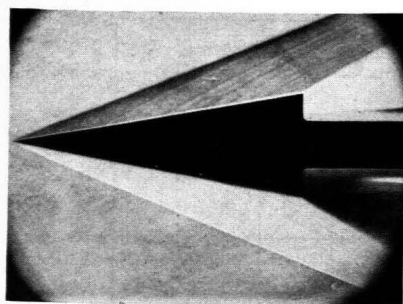
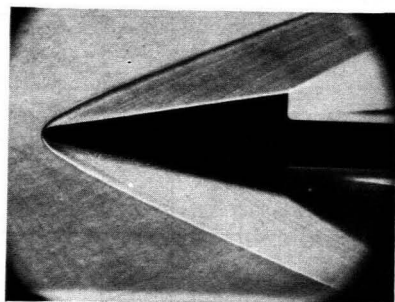
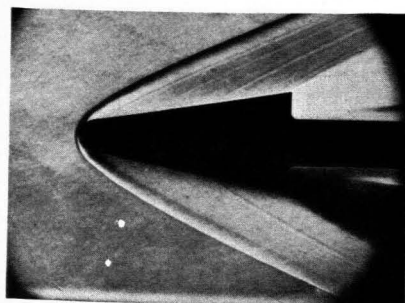
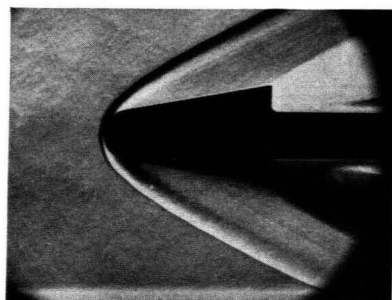
 $r/R_B = 0$  $r/R_B = 0,167$  $r/R_B = 0,333$  $r/R_B = 0,500$ 

Abb. 5. Verdichtungsstöße an einem spitzen und mehreren stumpfen Kreiskegeln mit verschiedenen Abrundungsradien der Kegel Nase bei der Machzahl  $Ma = 2,93$ ; halber Kegelwinkel  $\gamma = 10^\circ$ ; Grundflächenradius  $R_B = 15$  mm; Abrundungsradien  $r = 0; 2,5; 5; 7,5$  mm; Abrundungsverhältnisse  $r/R_B = 0; 0,167; 0,333; 0,500$

## 4. Meßergebnisse

### 4. 1. Stoßabstand

Zur Bestimmung der Stoßabstände an den abgestumpften Kegeln wurden für mehrere Machzahlen Schlierenaufnahmen gemacht. Für die Machzahl 2,93 sind die Photographien in Abb. 5 angegeben. Die gemessenen Stoßabstände  $e$  wurden in Abb. 6 über der Machzahl mit der Abrundung  $r$  als Parameter aufgetragen. Daraus ersieht man, daß der Stoßabstand mit der Machzahl abnimmt und mit  $r$  ansteigt. Bildet man mit dem Abrundungsradius  $r$  den dimensionslosen Stoßabstand  $e/r$  und trägt ihn mit  $r/R_B$  als Parameter auf (Abb. 7), so erhält man ebenfalls eine Abnahme mit der Machzahl, aber im Gegensatz zum absoluten Stoßabstand auch eine Abnahme mit  $r/R_B$ . Als Vergleich wurden in den Abb. 6 und 7 die Ergebnisse von Kugelmessungen aus [3], Seite 105, miteingetragen.

### 4. 2. Druckverteilung

Die auf der Kontur der Kegel gemessenen Drücke wurden mit dem Ruhedruck hinter dem senkrechten Verdichtungsstoß am Staupunkt der Modelle  $p_0'$  dimensionslos gemacht. In Abb. 8 sind als Beispiele die Ergebnisse für die Machzahl



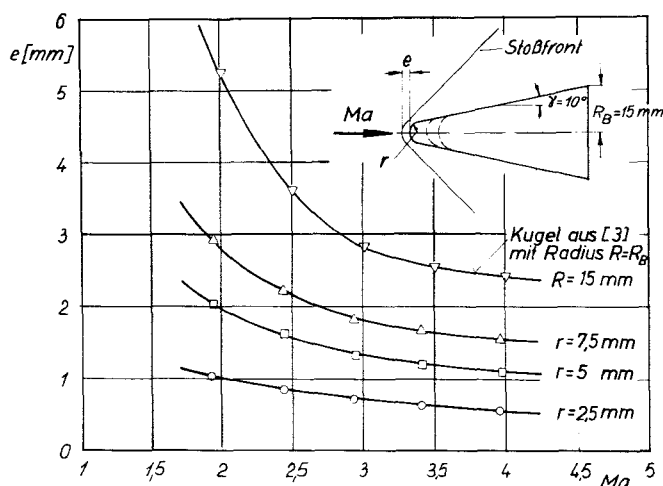


Abb. 6. Stoßabstand von stumpfen Kreiskegeln mit verschiedener Abrundung der Kegelnase in Abhängigkeit von der Machzahl; halber Kegelwinkel  $\gamma = 10^\circ$ ; Grundflächenradius  $R_B = 15$  mm; Abrundungsradien  $r = 2,5; 5; 7,5$  mm

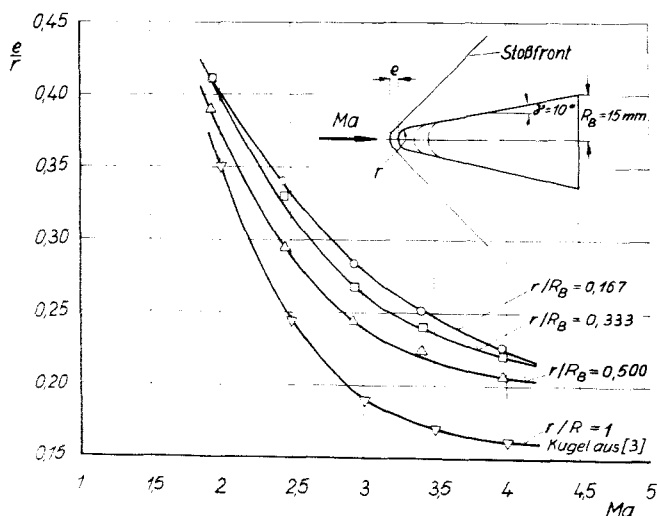


Abb. 7. Dimensionsloser Stoßabstand von stumpfen Kreiskegeln mit verschiedener Abrundung der Kegelnase in Abhängigkeit von der Machzahl; halber Kegelwinkel  $\gamma = 10^\circ$ ; Grundflächenradius  $R_B = 15$  mm; Abrundungsverhältnisse  $r/R_B = 0,167; 0,333; 0,500$

$Ma = 2.93$  über der dimensionslosen Konturkoordinate  $s/r$  mit dem Verhältnis  $r/R_B$  als Parameter aufgetragen. Die Reynoldszahl wurde mit dem Durchmesser der Bodenfläche der Kegel gebildet,  $Re_D = V_\infty D_B/r$ .

Der Druck ist erwartungsgemäß im Staupunkt am größten und fällt dann mit wachsendem  $s/r$  sehr stark ab. Bei  $s/r \approx 1,4$  erreicht er den kleinsten Wert und

bleibt auf dem Kegelmantel annähernd konstant. Eine Abhängigkeit der Druckverteilung vom Verhältnis  $r/R_B$  ist wegen der Affinität der Körperkonturen nicht zu erwarten.

Ein Vergleich der Druckverteilungen mit  $r/R_B = 0,5$  bei verschiedenen Machzahlen in Abb. 9 zeigt eine Abnahme des auf  $p_0'$  bezogenen Druckes auf der Kontur mit Zunahme der Machzahl.

Abb. 9 zeigt außerdem, daß bei der Machzahl  $Ma = 1,93$  eine Überexpansion der Strömung zwischen  $s/r = 1,2$  und 4 vorhanden ist. Für  $s/r > 4$  wird auf der Mantelfläche ebenfalls ein konstanter Druck erreicht.

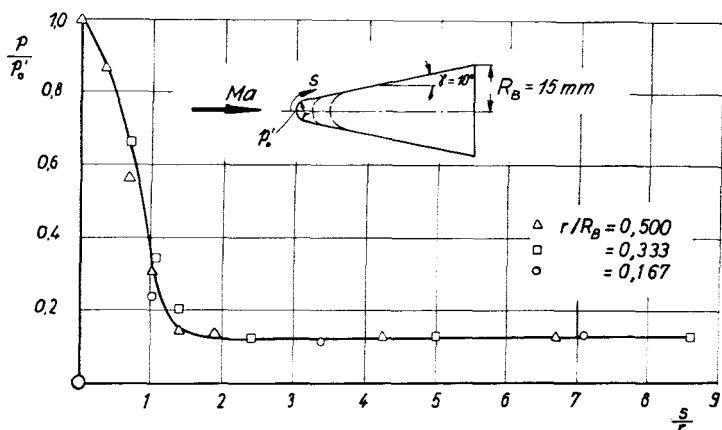


Abb. 8. Druckverteilung von stumpfen Kreiskegeln mit verschiedenen Abrundungsradien der Kegelnase bei der Machzahl  $Ma = 2,93$ ; halber Kegelwinkel  $\gamma = 10^\circ$ ; Grundflächenradius  $R_B = 15 \text{ mm}$ ; Abrundungsverhältnisse  $r/R_B = 0,167$ ;  $0,333$ ;  $0,500$ .  $Re_D = 13 \cdot 10^6$

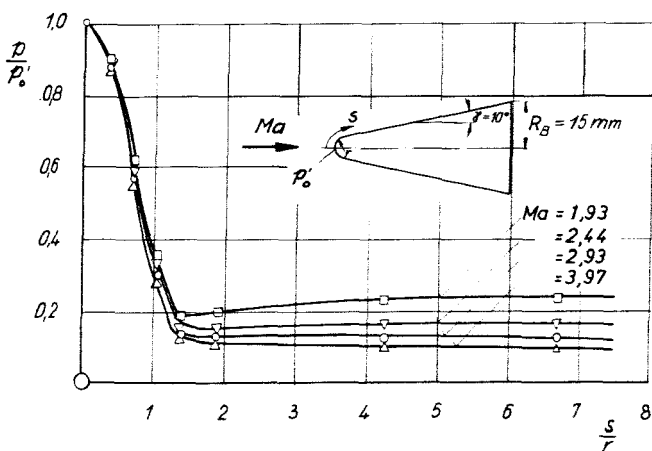


Abb. 9. Druckverteilung von einem stumpfen Kreiskegel bei verschiedenen Machzahlen; halber Kegelwinkel  $\gamma = 10^\circ$ ; Grundflächenradius  $R_B = 15 \text{ mm}$ ; Abrundungsverhältnis  $r/R_B = 0,5$ ; Reynoldszahlen  $Re_D = 10^6$  bis  $2 \cdot 10^6$

### 4. 3. Widerstandsbeiwert

Der Widerstand  $W$  wird mit dem Staudruck  $q_x = \rho_x V_x^2/2$  und der Bodenfläche der Kegel  $F = \pi R_B^2$  dimensionslos gemacht,  $c_W = W/Fq_x$ . Um den Widerstandsbeiwert des Vorkörpers  $c_{WV}$  zu erhalten, wird der gemessene Widerstandsbeiwert  $c_W$  auf  $p_x$  als Bodendruck umgerechnet. Man erhält dann den Widerstandsbeiwert des Vorkörpers  $c_{WV}$  nach folgenden Gleichungen:

$$c_{WV} = c_W + \frac{p_B}{q_x} - \frac{p_x}{q_x} \quad (2)$$

oder mit

$$c_{pB} = \frac{p_B - p_x}{q_x} \quad (3)$$

$$c_{WV} = c_W + c_{pB} \quad (4)$$

Der nach Gl. (4) bestimmte Widerstandsbeiwert des Vorkörpers  $c_{WV}$  ist in Abb. 10 über der Machzahl mit dem Verhältnis  $r/R_B$  als Parameter aufgetragen. Er steigt mit zunehmender Abrundung  $r/R_B$  an, während er bei einem vorgegebenen  $r/R_B$  zunächst mit der Machzahl zunimmt und nach Erreichen eines

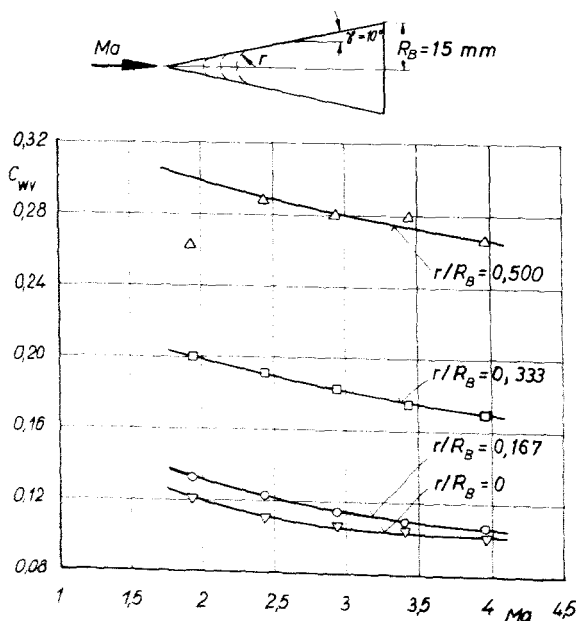


Abb. 10. Vorkörperwiderstand von einem spitzen und mehreren stumpfen Kreiskegeln mit verschiedener Abrundung der Kegelmase in Abhängigkeit von der Machzahl; halber Kegelhinkel  $\gamma = 10^\circ$ ; Grundflächenradius  $R_B = 15$  mm; Abrundungsverhältnisse  $r/R_B = 0; 0,167; 0,333; 0,500$ ; Reynoldszahlen  $Re_D \approx 10^6$  bis  $2 \cdot 10^6$ .

Maximums wieder abfällt. In Abb. 11 ist der Vorkörperwiderstand für drei Machzahlen in Abhängigkeit vom Verhältnis  $r/R_B$  dargestellt. Abb. 11 zeigt noch einmal deutlich das starke Ansteigen des Vorkörperwiderstandes mit zunehmendem Abrundungsradius  $r/R_B$ .

Um den absoluten Widerstand der Kegel zu bekommen, muß der genaue, ungestörte Bodendruck bekannt sein. Es ist im Windkanal schwierig, genaue Bodendruckmessungen zu machen.

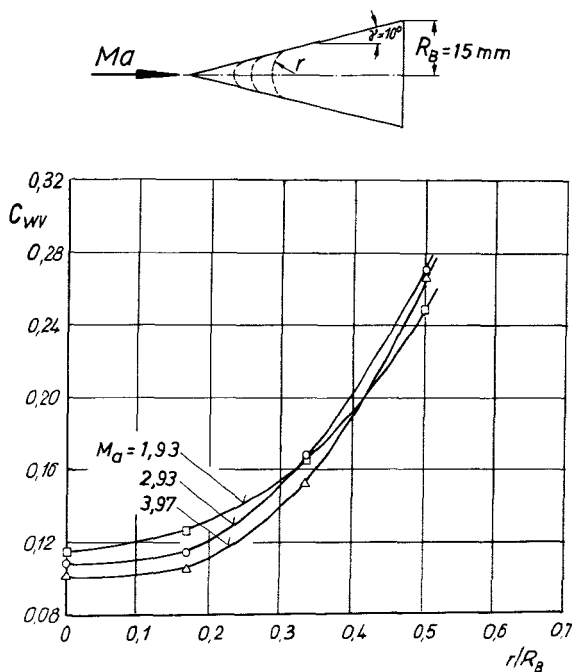


Abb. 11. Vorkörperwiderstand von einem spitzen und mehreren stumpfen Kreiskegeln bei verschiedenen Machzahlen in Abhängigkeit vom Abrundungsverhältnis  $r/R_B$ ; halber Kegelswinkel  $\gamma = 10^\circ$ ; Grundflächenradius  $R_B = 15 \text{ mm}$ ; Reynoldszahlen  $Re_D = 10^6$  bis  $2 \cdot 10^6$

## 5. Zusammenfassung

Es wurden für abgestumpfte Kegel mit einem halben Kegelswinkel von  $\gamma = 10^\circ$  bei verschiedenem Abrundungsradius der Nase  $r$  der Abstand des Verdichtungsstoßes von der Nase, die Druckverteilung auf der Körperkontur sowie der Vorkörperwiderstand in einem Machzahlbereich von  $Ma = 1,93$  bis  $3,97$  untersucht. Die Messungen des relativen Stoßabstandes  $\epsilon/r$  zeigen eine Abnahme mit zunehmender Abrundung der Körperrase  $r/R_B$  und mit wachsender Machzahl. Dagegen ist die Druckverteilung nicht von  $r/R_B$ , sondern nur von der Machzahl abhängig. Der Vorkörperwiderstand nimmt mit zunehmender Abstumpfung  $r/R_B$  beträchtlich zu, während er bei einem vorgegebenen  $r/R_B$  zunächst mit der Machzahl zunimmt und nach Erreichen eines Maximums wieder abfällt.

**Literatur**

- [1] *H. Köster*: Beschreibung und Eichung des  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  Überschall-Windkanals der DFL. Ber. 65/18 d. Inst. f. Aerodynamik der DFL Braunschweig (1965).
- [2] *Landolt-Börnstein*: Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik. Vierter Band: Technik. 1. Teil: Stoffwerte und mechanisches Verhalten von Nichtmetallen. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg (1955), 6. Auflage.
- [3] *H. W. Liepmann, A. Roshko*: Elements of Gasdynamics; John Wiley & Sons, Inc. New York (1957).